

DOI: 10.11883/bzycj-2017-0395

# 基于反向撞击法的 JB-9014 炸药 Hugoniot 关系测量\*

裴红波<sup>1</sup>, 刘俊明<sup>2</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 舒俊翔<sup>1</sup>, 黄文斌<sup>1</sup>, 郑贤旭<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了获得 JB-9014 未反应炸药的 Hugoniot 关系, 在火炮加载平台上利用反向撞击技术对 JB-9014 炸药进行一维平面冲击实验。将 JB-9014 炸药样品作为飞片安装于弹托前表面, 将镀膜氟化锂窗口作为装置靶。利用火炮加速弹托, 使炸药样品以一定速度撞击镀膜氟化锂窗口, 通过光子多普勒测速仪 (photonic Doppler velocimetry, PDV) 测量炸药样品击靶速度以及炸药/镀膜氟化锂窗口界面粒子速度。最终根据冲击波阵面守恒关系计算获得了 JB-9014 炸药冲击 Hugoniot 数据, 采用正交回归直线拟合得到了炸药样品在 3.1~8.2 GPa 压力范围内的冲击 Hugoniot 关系:  $D_s=2.417+2.140u_s$  ( $D_s$  和  $u_s$  的单位均为 km/s)。结果表明: 该方法测试精度较高, 响应时间快 (小于 5 ns), 同时该方法可以对炸药的反应情况进行检测, 便于判断实验是否测得真实的未反应炸药冲击 Hugoniot 数据。

**关键词:** JB-9014 炸药; Hugoniot 关系; 反向撞击; 光子多普勒测速仪 (PDV); 粒子速度

**中图分类号:** O381; TJ55 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

炸药的冲击 Hugoniot 关系是指炸药从同一初始状态出发, 经过不同的冲击压缩达到终态的集合<sup>[1]</sup>。它反映了冲击波后炸药热力学状态量之间的关系, 其对标定未反应炸药的状态方程、研究炸药的冲击起爆、进行爆轰数值模拟以及理解爆轰反应区结构具有重要的意义, 实际应用中使用的最多的炸药 Hugoniot 关系就是炸药中冲击波速度  $D$  与波后粒子速度  $u$  之间的关系。大量实验表明, 在凝聚介质中冲击波的速度  $D$  与其波后质点速度  $u$  之间, 在相当宽的速度范围 (或压力范围) 存在着线性关系<sup>[2]</sup>:

$$D = a + bu \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $b$  为待定系数, 需要通过实验测量确定。

到目前为止, 已经有多种测试炸药冲击 Hugoniot 关系的方法, 如楔形药实验法<sup>[3]</sup>、冲击波速度对比法<sup>[4]</sup>、压力对比法<sup>[5-6]</sup>、速度对比法<sup>[7]</sup>、组合式电磁速度计法等<sup>[8-9]</sup>。测试手段方面, 采用的有电磁速度计<sup>[3, 7-11]</sup>、扫描相机<sup>[3-4]</sup>、VISAR<sup>[10-11]</sup>、锰铜压力计<sup>[5-6, 12-13]</sup>等。由于炸药为不导电材料, 常被用来测量金属材料的电探针技术在测量炸药冲击 Hugoniot 关系中应用较少。在加载技术方面, 近年来采用的主要是气炮加载、透镜加载。相比于炸药透镜加载, 火炮或者气炮加载平面性更好, 而且更易控制和测试输入压力的大小。不同于金属等惰性材料, 炸药在强冲击波作用下会发生反应, 这就要求测试所用的传感器具有较短的响应时间, 否则仪器记录到的就是一部分反应后炸药的冲击 Hugoniot 状态, 从而给测试数据引入较大的不确定度。锰铜压力计、电磁速度计响应时间一般大于 20 ns, 楔形药实验通过扫描相机测量冲击波在炸药中的传播轨迹, 获得的是一段时期内冲击波的平均速度, 其响应时间也较长。此外, 受传感器标定、安装、电路干扰等因素的影响, 上述测试方法的精度普遍不高, 导致测试数据分散性较大,

\* 收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金 (U1630113);  
国防技术基础项目 (JSZL2015212C001)

第一作者: 裴红波 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, hongbo2751@sina.com;

通信作者: 刘俊明 (1990—), 男, 硕士研究生, 13521934162@163.com。

通常需要进行多发实验来获得较准确的冲击 Hugoniot 关系。因此,有必要发展新的测试方法,提高炸药冲击 Hugoniot 数据的测试精度。

PDV (photon Doppler velocimetry) 是近年来新发展的一种激光干涉测试技术,其具有使用方便、响应快、测试精度高等优点,被广泛应用于各种爆炸、冲击测试<sup>[14-15]</sup>。传统的冲击 Hugoniot 测试中,样品都是固定不动的,一般通过炸药或者火炮驱动飞片撞击样品,使样品中产生冲击波,这种方式下难以通过激光干涉法测量撞击面的粒子速度。一个可行的办法就是将样品作为飞片去撞击透明光学窗口,然后根据冲击波阵面上的守恒条件计算炸药样品的冲击 Hugoniot 关系。谭叶等<sup>[16]</sup>利用该方法成功获得了惰性材料 Bi 的冲击 Hugoniot 数据。

以三氨基三硝基苯(TATB)为基的塑性粘结炸药,由于其良好的安全性能,在军事上获得了广泛的应用。例如:JB-9014 炸药是以 TATB 为基的塑性粘结炸药,其配方组分为质量分数 95% 的 TATB 和 5% 粘结剂,典型装药密度为 1.895 g/cm<sup>3</sup>,对应的爆速为 7.66 km/s。已有 JB-9014 炸药冲击 Hugoniot 数据不确定度较大<sup>[6]</sup>,且与类似配方 PBX-9502 的 Hugoniot 数据存在较大差异,有待进一步研究。本文中,在火炮平台上,采用反向撞击法通过 PDV 技术测量 JB-9014 炸药的冲击 Hugoniot 数据,拟合得到 JB-9014 炸药的冲击 Hugoniot 关系,并与已有的文献报道数据进行比较,以期为深入开展 JB-9014 炸药的冲击起爆、反应区结构研究以及爆轰数值模拟奠定基础。

## 1 实验方法

### 1.1 实验原理

反向撞击法是将待测样品作为飞片安装在弹托上直接撞击镀膜 LiF 窗口,其原理如图 1 所示。在拉格朗日坐标系中,安装在弹托上的炸药样品经火炮加速后以终速  $W$  撞击静止镀膜 LiF 窗口,样品和窗口中将分别产生左行和右行冲击波,样品和窗口中的压力、粒子速度等状态也由  $p_{0s}$ 、 $u_{0s}$ 、 $D_{0s}$ 、 $p_{0w}$ 、 $u_{0w}$ 、 $D_{0w}$  变为  $p_s$ 、 $u_s$ 、 $D_s$ 、 $p_w$ 、 $u_w$ 、 $D_w$ 。

由冲击波的基本关系式可知,在一维平面情况下,冲击波阵面的质量和动量守恒,其方程分别为:

$$\rho(D-u) = \rho_0(D-u_0) \quad (2)$$

$$p + \rho(D-u)^2 = p_0 + \rho_0(D-u_0)^2 \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)可得:

$$p - p_0 = \rho_0(D-u_0)(u-u_0) \quad (4)$$

式中: $\rho$ 、 $D$ 、 $u$  和  $p$  分别为冲击波阵面后的密度、冲击波速度、粒子速度和压力,下标 0 表示初始状态。

在欧拉坐标中,根据界面连续性条件可以得到:

$$u_s = W - u_w \quad (5)$$

$$p_s = p_w \quad (6)$$

根据式(4)和(5),炸药样品和 LiF 窗口中冲击波后压力可分别表示为:

$$p_w = \rho_{0w} D_w u_w \quad (7)$$

$$p_s = \rho_{0s} D_s (W - u_s) \quad (8)$$

联立式(6)~(8),得到炸药样品内的冲击波速度:

$$D_s = \frac{\rho_{0w} D_w u_w}{\rho_{0s} (W - u_s)} \quad (9)$$

式中: $\rho_{0s}$  和  $\rho_{0w}$  分别为样品和窗口的初始密度。窗口材料的  $D-u$  曲线一般满足线性关系:

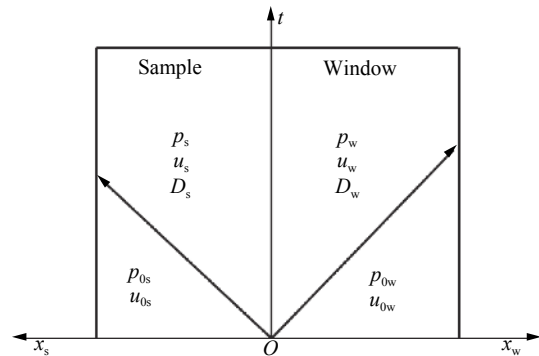


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental principle

$$D_w = a_w + b_w u_w \quad (10)$$

式中:  $a_w$  和  $b_w$  为窗口材料的 Hugoniot 参数。联立式(9)~(10)可得:

$$D_s = \frac{\rho_{0w}(a_w + b_w u_w)u_w}{\rho_{0s}(W - u_s)} \quad (11)$$

根据式(5)和(11),在已知窗口材料 Hugoniot 参数的条件下,利用反向撞击法测量炸药样品的 Hugoniot 参数时,只需要测量样品击靶的速度  $W$  和波后粒子速度  $u_w$ ,即可获得炸药样品中波后粒子速度  $u_s$  和冲击波速度  $D_s$ 。

## 1.2 实验装置

实验在口径为 57 mm 的火炮上进行,JB-9014 炸药样品尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。装置示意图如图 2 所示,装置实物图如图 3 所示,将圆柱状的 JB-9014 炸药样品安装在弹托上,利用口径为 57 mm 的火炮将弹托发射至终点弹道速度  $W$ ,并且撞击 LiF 光学窗口。LiF 窗口的尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ ,其撞击面一端镀有约  $0.7 \mu\text{m}$  厚的铝膜,一般冲击波在铝膜内反射 2~3 次后压力可达到平衡,据此估算窗口的响应时间约为 0.6 ns。LiF 窗口通过支架安装在炮管正前方,安装时利用工装确保炸药撞击面与炮管轴线垂直,在火炮直径 57 mm 范围内,飞片加载的平面性优于 10 ns。利用光子多普勒测速仪(PDV)同时测量样品击靶速度  $W$  和窗口的界面粒子速度  $u_w$ 。PDV 测速探头的直径为 3.2 mm,探头输出激光的焦斑直径小于 0.3 mm,探头距离窗口反射面的距离约为 35 mm。实验前对爆炸罐抽真空,实验时爆炸罐内压强小于 200 Pa,激光测速探头通过爆炸罐上的光纤法兰与罐外仪器设备相连。

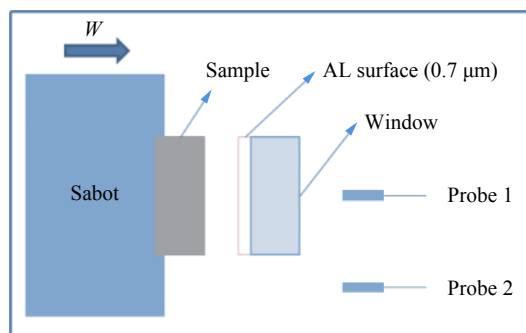


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

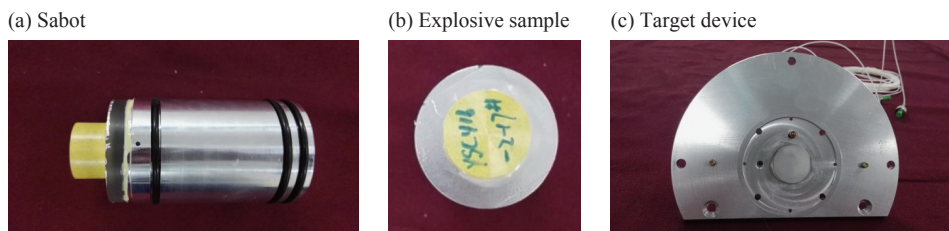


图 3 实验装置实物图

Fig. 3 Physical diagrams of experimental devices

实验中使用光子多普勒测速仪 CAEP-PDV-3,该测速仪为全光纤结构,结构较紧凑。PDV 使用的激光波长为 1 550 nm,当被测物体的运动速度为 1 km/s 时,对应的差频频率为 1.29 GHz。该 PDV 的光电探测器的带宽为 12.5 GHz,与其配套的采集示波器带宽为 13 GHz,示波器最高采样速率为 40 GS/s,受 PDV 探测器带宽的限制,该系统最高可以测量约 9.7 km/s 的速度。PDV 装置的具体结构及测速原理可参考文献 [14]。

## 2 结果与讨论

进行了 4 发实验,测量了 JB-9014 炸药样品在 3.1~8.2 GPa 压力范围内的样品击靶速度  $W$  和样品/窗口界面粒子速度  $u_w$ ,获得的界面粒子速度如图 4 所示。从图 4 可知,反向撞击法中,炸药样品直接与 LiF 窗口撞击,界面粒子速度迅速上升,紧接着是一个很平坦的平台,平台速度即为窗口的冲击波后粒子速度  $u_w$ ,平台阶段粒子速度的变化幅值小于 1%。在  $1 \mu\text{s}$  内炸药界面粒子速度没有出现上升,表明冲击加载下 JB-9014 炸药没有发生明显反应,实验中最大加载压力为 8.2 GPa,要小于 JB-9014 炸药的临界起

爆压力(约 10 GPa)。如果撞击过程中炸药发生了反应,则界面粒子速度会出现上升,因此,通过该方法可以对炸药的反应情况进行检测,便于判断实验是否测得真实未反应炸药的冲击 Hugoniot 数据。实验测得的飞片速度  $W$  如图 5 所示,图 5 中的时间零点为炸药撞击 LiF 窗口界面的时刻。从图 5 可知,炸药撞击窗口前速度较稳定,近似于一条直线,实验测得的撞靶时刻附近飞片速度变化小于 0.1%。

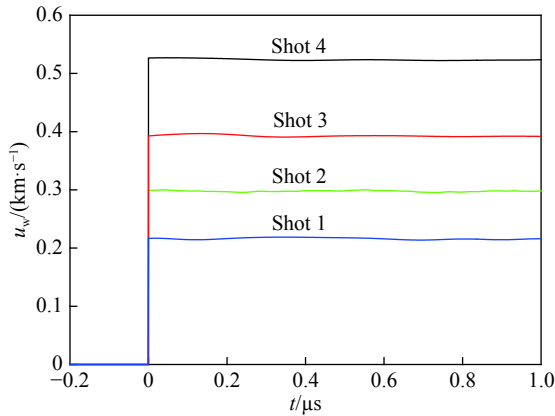


图 4 样品/窗口界面粒子速度

Fig. 4 Particle velocity at interface between sample and window

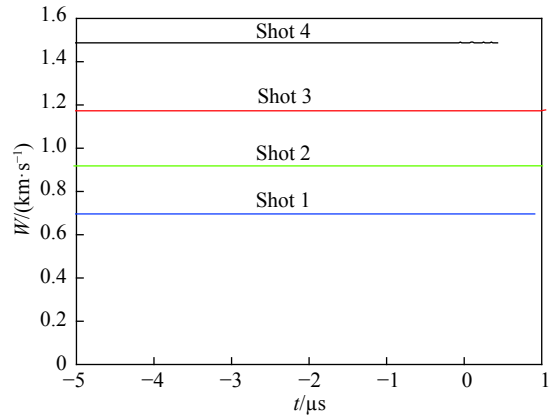


图 5 飞片速度曲线

Fig. 5 Flyer velocity-time curves

根据实验测量的飞片速度  $W$  和窗口界面粒子速度  $u_w$ , 利用式(8)和(11)计算得到 JB-9014 炸药的冲击波后压力、冲击波速度等参数见表 1。数据处理中涉及的 LiF 单晶 Hugoniot 参数为:  $\rho_w=2.641 \text{ g/cm}^3$ ,  $a_w=5.176 \text{ km/s}$ ,  $b_w=1.353^{[17]}$ 。

表 1 实验测试结果

Table 1 Experimental results

| 实验编号   | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $W/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | $u_w/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | $u_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | $D_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | $p/\text{GPa}$ |
|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Shot 1 | 1.883                                | 0.696                             | 0.216                               | 0.480                               | 3.433                               | 3.119          |
| Shot 2 | 1.889                                | 0.918                             | 0.300                               | 0.618                               | 3.788                               | 4.422          |
| Shot 3 | 1.893                                | 1.173                             | 0.394                               | 0.779                               | 4.028                               | 5.941          |
| Shot 4 | 1.891                                | 1.490                             | 0.527                               | 0.963                               | 4.501                               | 8.196          |

利用反向撞击法得到 JB-9014 炸药样品的  $D_s-u_s$  关系如图 6 所示。从图 6 可知,在测试压力范围附近,本文的实验结果与 Dick 等<sup>[3]</sup>的类似配方 PBX-9502 的实验结果较一致,且本文测试结果分散性更小。与张旭等<sup>[6]</sup>给出的数据相比,本文测得的数据整体偏高。张旭等<sup>[6]</sup>给出的数据由锰铜压阻计获得,锰铜压阻计测量精度与压阻系数的标定精度、封装保护等因素有关,另外由于锰铜压阻计测量的是电信号,实验过程易受干扰,因此,该数据的分散性较大。

采用反向撞击法测量 JB-9014 炸药冲击 Hugoniot 数据的实验中,不确定度主要源自窗口界面粒子速度、飞片速度和窗口材料的冲击 Hugoniot 参数。对于飞片速度,PDV 测速的相对标准不确定度约为 0.1%;对于窗口界面粒子速度,PDV 测速的相对标准不确定度约为 1%;如果窗口材料冲击 Hugoniot 参数的相对不确定度按照 0.5% 计算,则根

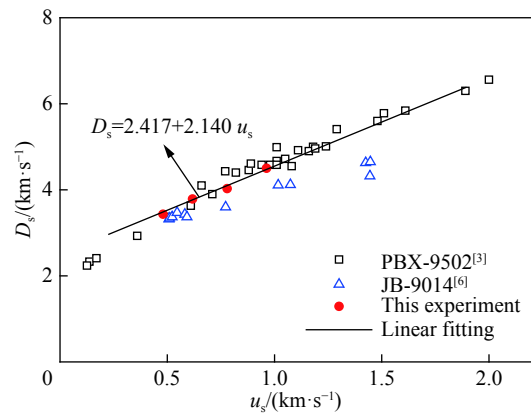


图 6 炸药样品的冲击波速度与粒子速度的关系

Fig. 6 Relation between shock velocity and particle velocity for the explosive samples

据不确定度的传递规律, 采用反向撞击法获得的样品粒子速度相对合成标准不确定度约为 1%, 冲击波速度的相对合成标准不确定度约为 1.8%。

由上述结果可知, 采用反向撞击法测量炸药冲击 Hugoniot 参数是可行的, 实验中主要参数均采用 PDV 测量, 数据不确定度要小于楔形药法、压力对比法、粒子速度对比法等方法的。受火炮加载能力的限制, 本文中暂时没有开展更高加载压力的实验, 根据已有的实验结果, 反向撞击法测试的响应时间约为 5 ns, 该值要明显低于锰铜压阻计、电磁速度计的响应时间, 通过提高弹托的发射速度, 有望得到更高压力下未反应炸药冲击的 Hugoniot 数据。

### 3 结 论

(1) 采用反向撞击法测量炸药冲击 Hugoniot 参数是可行的, 该方法实验原理简单, 数据处理方便, 精度较高, 实验获得的冲击 Hugoniot 数据粒子速度相对合成标准不确定度约为 1%, 冲击波速度的相对合成标准不确定度约为 1.8%。

(2) 反向撞击法中, 主要参数均采用 PDV 测试获得, 时间响应快, 小于 5 ns。同时, 该方法可以对炸药的反应情况进行检测, 便于判断实验是否测得真实的未反应炸药冲击 Hugoniot 数据。

(3) 在 3.1~8.2 G Pa 压力范围内, JB-9014 炸药的冲击雨贡曲线近似成线性关系, 可表示为  $D_s=2.417+2.140u_s$  ( $D_s$  和  $u_s$  的单位均为 km/s), 在该压力范围内, 本文得到的数据与类似炸药 PBX-9502 的数据<sup>[3]</sup> 较为接近。

### 参考文献:

- [1] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999: 197-198.
- [2] 李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 212-213.
- [3] DICK J J, FOREST C A, RAMSAY J B, et al. The Hugoniot and shock sensitivity of plastic-boned TATB explosive PBX-9502 [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 63(10): 4881-4888. DOI: 10.1063/1.340428..
- [4] COLEBURN N L, LIDDIARD T P. Hugoniot equations of state of several unreacted explosive [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1966, 44(10): 1929-1936. DOI: 10.1063/1.1726963..
- [5] 于川, 池家春, 刘文翰, 等. JB-9001 钝感炸药 Hugoniot 关系测试 [J]. *高压物理学报*, 1998, 12(1): 72-77. DOI: 10.11858/gywlb.1998.01.012.  
YU Chuan, CHI Jiachun, LIU Wenhan, et al. Shock Hugoniot relation of JB-9014 insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 12(1): 72-77. DOI: 10.11858/gywlb.1998.01.012.
- [6] 张旭, 池家春, 冯民贤, 等. JB9014 钝感炸药冲击绝热线测量 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(4): 304-308. DOI: 10.11858/gywlb.2001.04.011.  
ZHANG Xu, CHI Jiachun, FENG Minxian, et al. Hugoniot relation of JB9014 insensitive high explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(4): 304-308. DOI: 10.11858/gywlb.2001.04.011.
- [7] FU Hua, LI Tao, TAN Duowang. Shock Hugoniot relation of unreacted heterogeneous explosive [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2011, 25(21): 2905-2913. DOI: 10.1142/S0217979211100527.
- [8] GUSTAVSEN R L, SHEFFIELD S A, ALCON R R. Measurement of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX9502: Wave forms embedded gauges and comparison of four different material lots [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(11): 1-17. DOI: 10.1063/1.2195191.
- [9] DICK J J, MARTINEZ A R, HIXSON R S. Plane impact response of PBX-9501 and its components below 2 GPa: LA-13426-MS [R]. Los Alamos National Laboratory, 1998. DOI: 10.2172/663187.
- [10] SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L, ALCON R R. Hugoniot and initiation measurement on TANZ explosive: LA-UR-95-2765 [R]. 1995. DOI: 10.1063/1.50842.
- [11] SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L, ALCON R R, et al. High pressure Hugoniot and reaction rate measurements in PBX-9501 [C] // *Shock Compress of Condensed Matter-2003*. US: American Institute of Physics, 2004, 706: 1033-1036. DOI: 10.1063/1.1780414.

- [12] MILLETT J C F, BOURNE N K. The shock Hugoniot of a plastic bonded explosive and inert simulants [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): 2613–2617. DOI: 10.1088/0022-3727/37/18/018.
- [13] MILNE A, LONGBOTTOM A, BOURNE N, et al. On the unreacted Hugoniot of three plastic bonded explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(1): 68–72. DOI: 10.1002/prop.200700009.
- [14] STRAND O T, GOOSMAN D R, MARTINEZ C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(8): 083108–083108.
- [15] FERGUSON J W, TAYLOR P. Application of heterodyne velocimetry and pyrometry as diagnostics for explosive characterization [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(14). DOI: 10.1088/1742-6596/500/14/142014.
- [16] 谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 等. 反向碰撞法测量 Bi 的低压 Hugoniot 数据 [J]. *物理学报*, 2001, 60(10): 106401. DOI: 10.7498/aps.60.106401.
- TAN Ye, YU Yuying, DAI Chengda, et al. Measurement of low-pressure Hugoniot data for bismuth with reverse-impact geometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 60(10): 106401. DOI: 10.7498/aps.60.106401.
- [17] 赵万广, 周显明, 李加波, 等. LiF 单晶的高压折射率及窗口速度的修正 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(5): 571–576. DOI: 10.11858/gywlb.2014.05.010.
- ZHAO Wanguang, ZHOU Xianming, LI Jiabo, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(5): 571–576. DOI: 10.11858/gywlb.2014.05.010.

## Measurement of Hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method

PEI Hongbo<sup>1</sup>, LIU Junming<sup>2</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, SHU Junxiang<sup>1</sup>, HUANG Wenbin<sup>1</sup>, ZHENG Xianxu<sup>1</sup>

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;*

2. *Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

**Abstract:** In order to obtain the Hugoniot relation of unreacted JB-9014 explosive, one-dimensional plane impact experiments of the JB-9014 explosive were completed on a gun by using the reverse-impact method. The JB-9014 explosive sample was mounted on the front surface of the sabot as a flyer. The LiF window was taken as a device target. The sabot was accelerated to a certain speed by the gun and then the explosive sample impacted the LiF window. The impact velocity of the flyer and the particle velocity at the sample/window interface were measured by a photonic Doppler velocimetry (PDV). The Hugoniot data was obtained according to the conservation of the shock. The Hugoniot relationship of the JB-9014 explosive sample within the pressure range of 3.1–8.2 GPa was established by using the least square method. The results show that reverse-impact method has the characteristics of high accuracy and fast response time (<5 ns). In addition, the reverse-impact method can be used to detect the reaction degree of the JB-9014 explosive, which can be applied to judge whether the real Hugoniot data of the unreacted explosive is measured in the experiment.

**Keywords:** JB-9014 explosive; Hugoniot relation; reverse-impact; photonic Doppler velocimetry (PDV); particle velocity

(责任编辑 张凌云)